

# Использование методов математического (имитационного) моделирования при разработке конструктивных и технологических параметров высевающего аппарата

А. Кушнарв, чл.-кор. УААН, д-р техн. наук, проф. (УкрНИИПИТ им. Л. Погорелого), Е. Сербий, асп., С. Кушнарв, канд. техн. наук, доц. (Тавр. гос. аграр.-техн. ун-т), В. Шейченко, канд. техн. наук (УкрНИИПИТ им. Л. Погорелого)

Перспективным методом исследования рабочих процессов в земледельческой механике может быть математическое (имитационное) моделирование. Преимуществами имитационного моделирования перед натурным экспериментом являются возможность глубже проникнуть в физическую суть сложных процессов, существенное сокращение затрат на изготовление экспериментальных образцов, предусматриваемых многофакторным экспериментом, сокращение времени исследований и финансовых затрат [1].

Метод моделирования процессов на цифровых вычислительных машинах позволяет имитировать влияние случайных факторов, что обеспечивает в полной мере проявление флуктуационных свойств некоторых факторов на результат исследований, обладает большей точностью и простотой пользования.

Использование современных имитационных моделей основывается на идее метода Монте-Карло [2]. Процедура имитационного моделирования требует выполнения ряда этапов [3].

**Этап 1. Содержательное описание процесса.** Качественные и количественные характеристики процесса выражаются в словесной форме; полностью воспроизводится логика событий и явлений, потоков управляющей информации и всех выходных данных; конкретизируется цель моделирования с определением исходных характеристик процесса, которые следует фиксировать для получения необходимых данных.

**Этап 2. Создание формализованной схемы процесса.** Этот этап является промежуточным между содержательным описанием процесса и его математической моделью. Соотношения, выраженные в содержательном описании словесно, формализуются в математические зависимости, характерные закономерности записываются в виде уравнений.

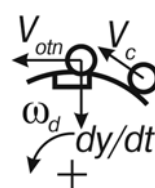
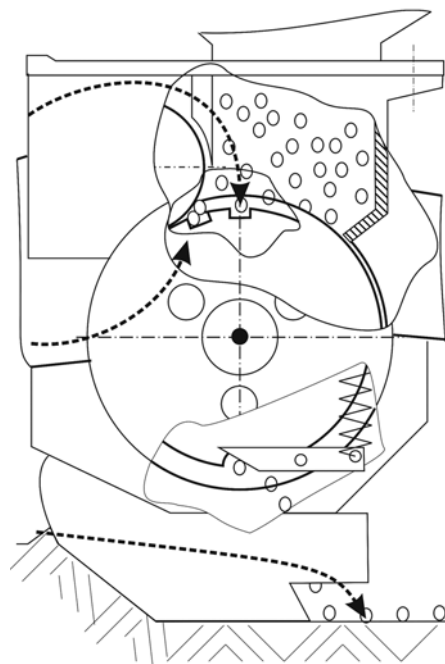
**Этап 3. Разработка математической модели.** На этом этапе все данные о процессе записываются в аналитической форме.

**Этап 4. Построение моделирующего алгоритма.** Математическая модель в начальном виде не может быть использована для аналитического исследования, и вообще не может содержать в явном виде искомые величины [4]. Поэтому построение моделирующего алгоритма является необходимым этапом перестройки математической модели для моделирования процесса на ЭВМ. В соответствии с этим алгоритмом в ЭВМ возникает информация, которая описывает элементарные явления опытного процесса и с учетом их взаимных влияний с помощью явных формул вычисляются исходные величины.

Для сложных систем невозможно построить зависимости между характеристиками состояний и пара-

метрами системы, поэтому необходимо разграничить процесс функционирования системы на большое количество мелких подпроцессов, математическое описание которых не представляет трудности.

Рассмотрим постановку и решение задачи "исследование высева овощных культур" механическим ячеисто-дисковым высевающим аппаратом с горизонтальной осью вращения методом имитационного моделирования. Параметром, определяющим качество работы высевающего аппарата, является равномерность высева семян. На рис. 1 дана схема формирования равномерности высева исследуемого высевающего аппарата (формализованная схема процесса).



## Заполнение ячеек семенами ( $k_1$ ):

- время взаимодействия  $t_z$ : скорость семен относительно ячейки  $V_{отн}$ , длина зоны западания  $S_z$ ;
- количество благоприятных встреч  $N_{zz}$ : длина семенной камеры  $L_{zz}$ , вероятность благоприятной встречи  $P_{ci}$ ;

## Формирование односемянного потока ячеек ( $k_1, k_2$ ):

- диаметр  $D_k$  и глубина  $H_k$  ячейки высевающего диска;
- диаметр  $D_v$  и упругость  $E_v$  выталкивателя;

## Подача и перераспределение в борозде:

- проекции вектора скорости падения  $V_x, V_y$ ;
- упругие характеристики соударяемых тел  $\epsilon_1$ .

Рис. 1. Формализованная схема процесса высева

Как видно по схеме, точность высева определяется тремя процессами, выполняемыми рабочими органами высевающего аппарата: заполнение ячейки, формирование односемянного потока ячеек, подача и перераспределение семян в борозде. Для каждого процесса нами созданы математические модели [5 - 7]. В статье приведены только конечные описания моделей.

1. Постановка и решение задачи первого процесса свелась к дифференциальному уравнению движения семян в виде [5]

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + A \frac{dy}{dt} + B \operatorname{tg} \tau - D \frac{dy}{dt} \operatorname{tg} \tau = C, \quad (1)$$

где  $A = 2 \frac{V_c}{R} \cdot f_{cc}$ ,  $B = -2(k-1)g \operatorname{ctg} \alpha_4 f_{cd} n$ ,

$$C = -2(k-1)g \operatorname{ctg} \alpha_4 n f_{cd} f_{cc} + (k-1)g \operatorname{ctg} \alpha_4 + g - \frac{V_c^2}{R},$$

$D = 2 \frac{V_c}{R}$ ,  $\operatorname{tg} \tau = \frac{R_2 - y}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 - (R_2 - y)^2}}$ ;  $f_{cc}$ ,  $f_{cd}$  - коэффициенты внутреннего трения и трения по диску;  $V_c$  - абсолютная скорость активного слоя семян, м/с;  $R_1$ ,  $R_2$  - радиусы западающего и соседнего семени, м;  $R$  - радиус высевающего диска, м;  $y$  - погружение семени в ячейку, м;  $k$  - количество семян, расположенных вдоль линии укладки;  $\alpha_4 = 45^\circ$  - угол укладки семян, град;  $n$  - положение семени относительно начала семенной камеры.

Постоянные коэффициенты уравнения (1) содержат параметры физико-механических свойств семян ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $f_{cc}$ ,  $f_{cd}$ ), геометрические и кинематические параметры высевающего диска, формы и размеров высевающих ячеек ( $V_c$ ,  $R$ ,  $k$ ).

2. Формирование односемянного потока ячеек путем отражения семян, находящихся поверх ячеек, описывается углом отражения [6]:

$$\delta = \arccos \frac{(d - R_1)^2 + (t - R_1)^2 + R_2^2 - (R_1 + R_2)^2}{2 \sqrt{(d - R_1)^2 + (t - R_1)^2} R_2}, \quad (2)$$

$$\alpha = \arccos \frac{(d - R_1)^2 + (t - R_1)^2 + R_2^2 - (R_1 + R_2)^2}{2 \sqrt{(d - R_1)^2 + (t - R_1)^2} R_2} - \arccos \frac{d - R_1}{\sqrt{(d - R_1)^2 + (t - R_1)^2}} - \arcsin \frac{r + a - R_2 \sin \delta}{R_2 + r}, \quad (2a)$$

$$\alpha_o = \alpha - \arcsin \frac{r + a - R_2 \sin(\delta)}{R_2 + r - S} - \arcsin \frac{r + a - R_2 \sin(\delta)}{R_2 + r} + \arccos(1 - \frac{S v_e}{R_2}), \quad (3)$$

где  $d$ ,  $t$  - диаметр и глубина ячейки, м;  $r$  - радиус активного выталкивателя, м;  $a$  - зазор между выталкивателем и высевающим диском, м;  $S$  - деформация активного выталкивателя, м;  $v_e$  - коэффициент Пуассона материала выталкивателя.

Эти уравнения включают связь физико-механических свойств семян и геометрических параметров диска.

3. Перераспределение семян в борозде зависит от вектора скорости их падения. При малом отклонении от вертикали этого вектора семена остаются на том месте (без отскока и продольного перемещения), куда они падают.

Задача ставилась, как колебательное движение ак-

тивного выталкивателя, и свелась к решению уравнения [7]

$$\frac{2\lambda}{V_{y1}} = \sqrt{\frac{(\frac{m_s}{12}(l_1^2 + l_2^2) + m_s(0.5l_1 - h_1)^2 + m_c h_2^2)V_{y1}^2 + 2\lambda m_c g h_2^2}{2h_1 h_2 g c_p \lambda}} + \frac{m_n}{3c_p} \times \arccos(\frac{\lambda_0}{\lambda}), \quad (4)$$

где  $m_b$ ,  $m_c$ ,  $m_n$  - масса соответственно выталкивателя, семени и пружины, кг;  $c_p$  - жесткость пружины, Н/м;  $\lambda_0$ ,  $\lambda$  - статическое и динамическое сжатия пружины, м;  $V_{y1}$  - вертикальная скорость выталкивания семени из ячейки, м/с.

В уравнении (4) параметры активного выталкивателя, свойства семян и кинематические параметры связаны.

Таким образом, все три последовательно происходящие события взаимодействия семян с рабочими органами высевающего аппарата описываются дифференциальными уравнениями, алгебраическими и геометрическими соотношениями. Проблемы возникают в следующем.

Если геометрические и кинематические параметры рабочих органов высевающего аппарата могут иметь постоянное значение, то физико-механические свойства семян, в том числе их размерные характеристики, носят стохастический характер. Решение задачи высева по средним физико-механическим параметрам не могут отражать реальность процесса.

Следовательно, стохастическое распределение физико-механических свойств должно присутствовать в приемах решения поставленной задачи.

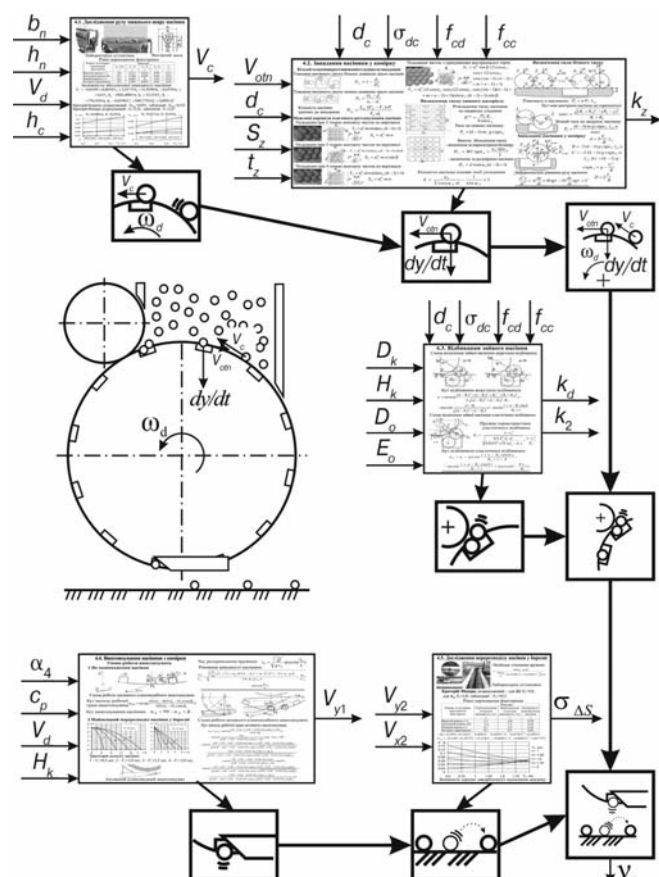
Схема постановки задачи имитационного моделирования приведена на рис. 2. Для реализации полученной математической модели на ЭВМ методом имитационного моделирования необходимо построить блок-схему моделирующего алгоритма (рис. 3), которая представляет собой конечный набор инструкций, описывающих процесс решения задачи [8].

Подобная сокращенная запись алгоритма, хотя и не содержит развернутых схем расчета отдельных величин, позволяет свободно ориентироваться в общей идее построения моделирующего алгоритма и достаточно полно отображает его логическую структуру.

При построении моделирующего алгоритма в первую очередь выбираем основные операторы для имитации процесса функционирования отдельных элементов системы, которые должны быть связаны между собой в соответствии с формализованной схемой исследуемого процесса.

Статистические характеристики физико-механических свойств семян приведены на рис. 4, динамические коэффициенты трения - на рис. 5, а влияние механических воздействий на всхожесть семян - на рис. 6.

С помощью построенного моделирующего алгоритма можно решать широкий спектр задач по изучению работы высевающего аппарата данной конструкции. Кроме того, можно следить за движением каждого семени, попадающего в ячейку, проводить однофакторные эксперименты, по которым устанавливать влияние каждого геометрического и кинематического параметра рабочего органа на качество (равномерность и всхожесть) высева.



Подпроцесс	Входящие параметры		Выходящие параметры	
	Символ	Наименование	Символ	Наименование
Движение активного слоя семян		$b_n$ Ширина клиновидной проточки диска $h_n$ Глубина клиновидной проточки диска $V_d$ Линейная скорость ячейки диска $h_c$ Высота уровня семян в семенной камере	$V_c$	Абсолютная скорость семян
Западение семени в ячейку		$V_{otn}$ Скорость семян относительно диска $d_c$ Диаметр семени $S_z$ Длина зоны западания $t_z$ Время западания $\sigma_{dc}$ Стандарт размера семени $f_{cd}, f_{cc}$ Коэффициенты трения семян	$k_z$	Коэффициент заполнения ячеек
Формирование односеменного заполнения ячеек		$D_k$ Диаметр ячейки $H_k$ Глубина ячейки $D_o$ Диаметр отражателя $E_o$ Упругость отражателя	$k_d$ $k_2$	Коэффициент дробления Коэффициент двойного высева
Подача семян в борозду		$\alpha_n$ Угол наклона выталкивателя $C_p$ Жесткость пружины выталкивателя		
Перераспределение семян в борозде		$V_{x2}$ Горизонтальная скорость падения семени в борозду $V_{y2}$ Вертикальная скорость падения семени в борозду	$c$	Стандарт перераспределения семян в борозде
Общее			$v_x$	Коэффициент вариации интервалов между семенами в борозде

Рис. 2. Схема постановки задачи имитационного моделирования работы высевающего аппарата

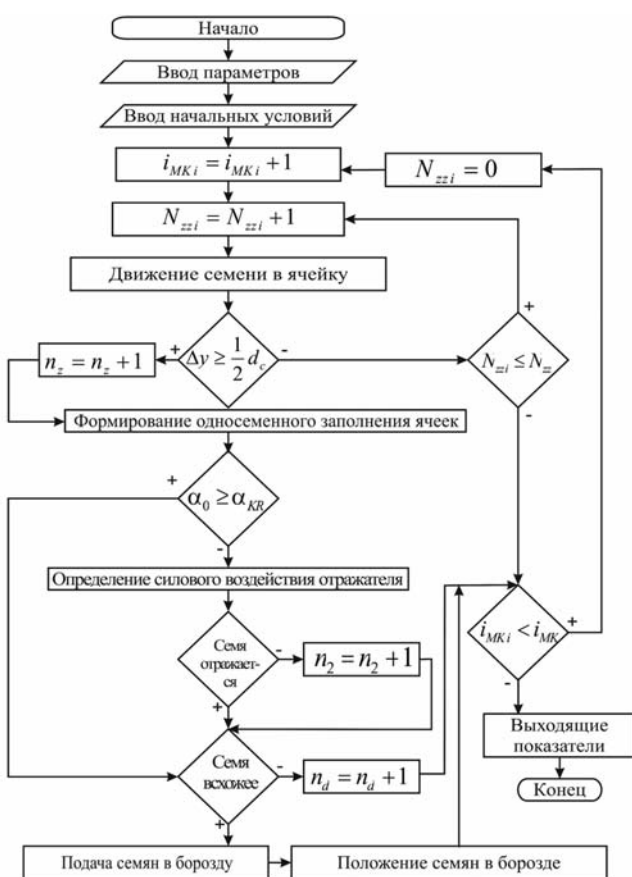


Рис. 3. Блок-схема моделирующего алгоритма

Однако в целях сокращения объема моделирующих экспериментов поставим интегральную задачу - при каких значениях параметров конструкции высевающего аппарата происходит минимальное повреждение и максимальная равномерность высева. В моделирующий алгоритм входит пять параметров конструкции высевающего аппарата:  $h_n$ ,  $b_n$  - глубина и ширина клиновидной проточки высевающего диска;  $D_k$  - диаметр ячейки высевающего диска;  $V_d$  - линейная скорость ячейки высевающего диска;  $C_p$  - жесткость пружины выталкивателя.

Проведем пятифакторный эксперимент по плану Бокса-Бенкина. При натурных экспериментах нам было бы необходимо изготовить 41 вариант высевающего аппарата, а затем провести с ними натурные эксперименты минимум в трехкратной повторяемости и оценить затраты времени, материалов, трудовых и технологических ресурсов на проведение натурального эксперимента.

Для проведения многофакторного эксперимента на имитационной модели достаточно фиксировать в начальных условиях параметры  $h_n$ ,  $b_n$ ,  $D_k$ ,  $V_d$ ,  $C_p$  на уровне, заданном по их матрице.

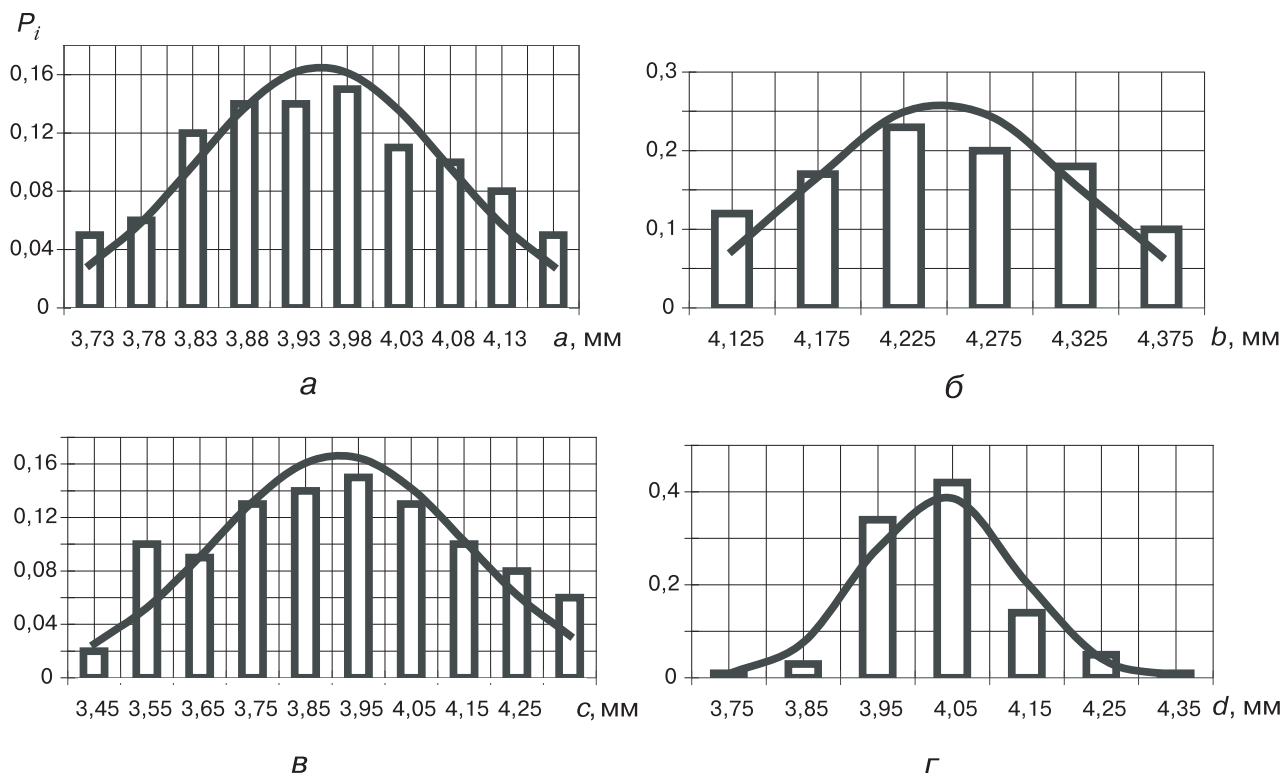


Рис. 4. Распределение размерных характеристик семян по длине (а), ширине (б), толщине (в) и эквивалентному диаметру (г): столбики – эмпирическая, кривая – нормальная

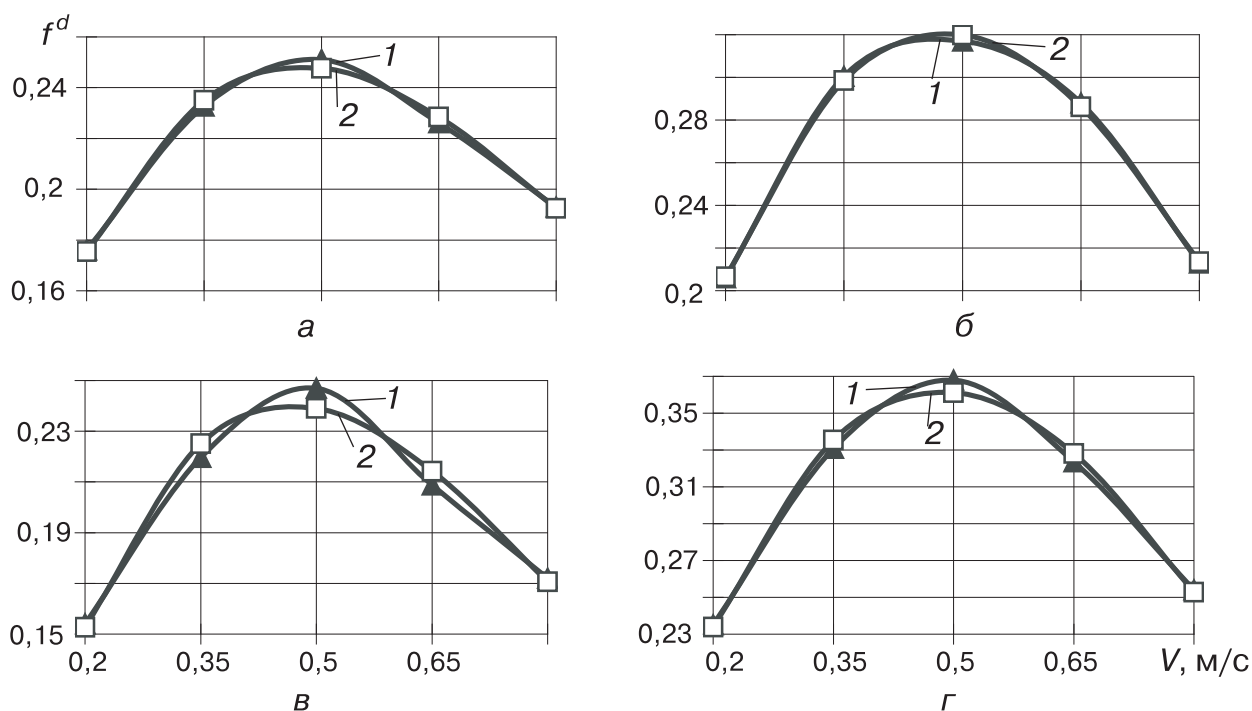


Рис. 5. Динамические коэффициенты трения  $f^d$  семян по алюминию (а); по рифленому алюминию (б); по стали (в); по резине (г), опытные (1) и аппроксимированные (2)

Установим уровни варьирования факторов (табл. 1) и образуем матрицу экспериментов (табл. 2). Затем проведем 41 имитационный эксперимент в трехкратной повторяемости (для увеличения точности можем провести большее количество экспериментов). В результате обработки материалов получаем уравнение регрессии зависимости равномерности высева от параметров высевающего аппарата

$$\begin{aligned}
 V_C = & +4,19 \cdot 10^2 - 4,79 \cdot 10^4 h_n + 5,84 \cdot 10^3 b_n - 1,83 \cdot 10^6 D_k + 7,86 \cdot 10^3 V_d + \\
 & + 5,24 \cdot 10^{-3} c_p - 1,62 \cdot 10^5 h_n b_n + 1,01 \cdot 10^7 h_n D_k - 0,44 \cdot 10^5 h_n V_d - \\
 & - 0,13 h_n c_p - 1,46 \cdot 10^6 b_n D_k + 0,94 \cdot 10^4 b_n V_d + 0,08 b_n c_p - \\
 & - 1,68 \cdot 10^6 D_k V_d - 5,63 D_k c_p + 0,04 V_d c_p + 3,16 \cdot 10^5 h_n^2 + \\
 & + 6,07 \cdot 10^4 b_n^2 + 2,00 \cdot 10^8 D_k^2 + 3,24 \cdot 10^3 V_d^2 + 2,80 \cdot 10^{-5} c_p^2,
 \end{aligned} \quad (5)$$



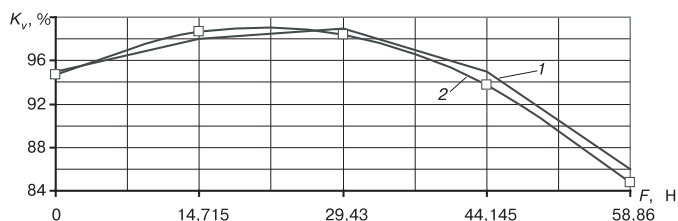


Рис. 6. Зависимость всхожести семян от воспринятой нагрузки по опытам (1) и аппроксимированная (2)

а также вычисляем оптимальные значения параметров:  $h_n = 0,006$  м,  $b_n = 0,0088$  м,  $D_k = 0,0051$  м,  $V_d = 0,155$  м/с,  $c_p = 250$  Н/м.

Оптимальные параметры, полученные по имитационным испытаниям, необходимо проверить на адекватность в полевых экспериментах, чтобы доказать их сходимость и надежность. Для этого необходимо поставить двухфакторный эксперимент. Один из факторов должен быть из числа факторов, входящих в матрицу многофакторных экспериментов (табл. 2).

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

Уровень и интервал варьирования факторов	Факторы				
	$h_n$ , м	$b_n$ , м	$D_k$ , м	$V_d$ , м/с	$c_p$ , Н/м
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
Верхний уровень (+)	0,01	0,012	0,0054	0,23	400
Основной уровень (0)	0,005	0,009	0,0052	0,20	200
Нижний уровень (-)	0,000	0,006	0,0050	0,17	0
Интервал варьирования	0,005	0,003	0,0002	0,03	200

Таблица 2

Матрица и результаты экспериментов

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y$	№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y$
1	1	1	1	0	0	0	35,2	22	1	0	1	1	0	0	37,9
2	1	-1	1	0	0	0	37,8	23	1	0	-1	1	0	0	37,3
3	1	1	-1	0	0	0	37,4	24	1	0	1	-1	0	0	60,4
4	1	-1	-1	0	0	0	54,5	25	1	0	-1	-1	0	0	56,3
5	1	0	0	1	1	0	39,7	26	1	1	0	0	1	0	40,6
6	1	0	0	-1	1	0	80,1	27	1	-1	0	0	1	0	51,0
7	1	0	0	1	-1	0	36,9	28	1	1	0	0	-1	0	34,4
8	1	0	0	-1	-1	0	37,1	29	1	-1	0	0	-1	0	33,1
9	1	0	1	0	0	1	39,9	30	1	0	0	1	0	1	37,4
10	1	0	-1	0	0	1	36,2	31	1	0	0	-1	0	1	56,3
11	1	0	1	0	0	-1	41,8	32	1	0	0	1	0	-1	39,2
12	1	0	-1	0	0	-1	38,3	33	1	0	0	-1	0	-1	57,2
13	1	1	0	1	0	0	40,7	34	1	1	0	0	0	1	36,6
14	1	-1	0	1	0	0	38,2	35	1	-1	0	0	0	1	37,8
15	1	1	0	-1	0	0	40,3	36	1	1	0	0	0	-1	38,6
16	1	-1	0	-1	0	0	58,2	37	1	-1	0	0	0	-1	39,9
17	1	0	0	0	1	1	51,1	38	1	0	1	0	1	0	53,6
18	1	0	0	0	-1	1	33,0	39	1	0	-1	0	1	0	48,6
19	1	0	0	0	1	-1	52,3	40	1	0	1	0	-1	0	33,6
20	1	0	0	0	-1	-1	35,2	41	1	0	-1	0	-1	0	32,0
21	1	0	0	0	0	0	37,7								

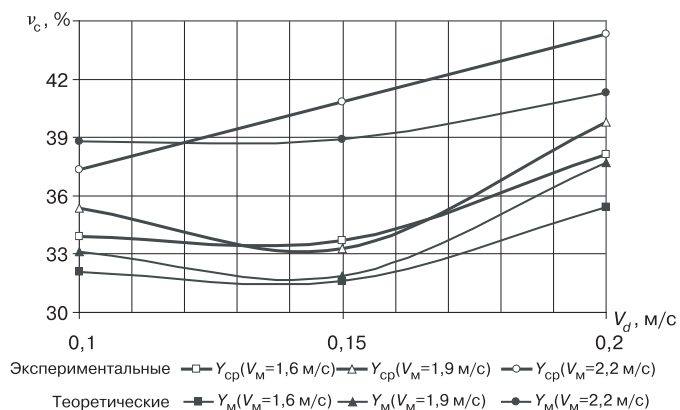


Рис. 7. Результаты полевого и имитационного испытаний при различных скоростях движения сеялки

Анализ факторов  $h_n$ ,  $b_n$ ,  $D_k$ ,  $V_d$ ,  $c_p$  показывает, что наиболее простым техническим решением является управление линейной скоростью ячейки высевашеющего диска  $V_d$ . Этот фактор может регулироваться передаточным отношением от привода колес к высевашему аппарату. Остальные факторы требуют изготовления экспериментальных высеваших дисков или сменных конструкций активных выталькивателей. В качестве второго фактора выбрана скорость движения сеялки  $V_M$ .

В полевых условиях на сеялке, имеющей оптимальные параметры рабочих органов, проводим полевой двухфакторный эксперимент, варьируя параметрами  $V_d$  и  $V_M$  (рис. 7).

Сравнение результатов имитационного и полевого испытаний показывает, что получен достаточно высокий уровень сходимости как по значению, так и по характеру кривых, а небольшие расхождения обусловлены принятием нами в постановки задачи шарообразности формы семян.

Список литературы

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем. Искусство и наука. - М.: Мир, 1978. - 312 с.
2. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. - М.: Наука, 1973. - 312 с.
3. Хэдми А. Таха. Введение в исследование операций, 6-ое издание: Пер. с англ. - М.: Вильямс, 2001. - 912 с.
4. Бусленко Н. П. Метод статистического моделирования. - М.: Статистика, 1970. - 125 с.
5. Сербій Є. К. Визначення рівняння руху насінини у просторі над комірною висівного диску // Праці ТДАТА. - 2007. - Вип. 7, т. 2. - С. 139-154.
6. Кушнарков А. С., Рубцов М. О., Сербій Є. К. Визначення конструктивних параметрів комірок висівного диску // Те саме. - 2006. - Вип. 42. - С. 101-108.
7. Сербій Є. К., Макущенко С. В. Дослідження роботи виштовхувача вертикально-дискового висівного апарату // Те саме. - 2007. - Вип. 7, т. 1. - С. 195-205.
8. Ковалюк Т. В. Основи програмування. - К.: BHV, 2005. - 384 с.